



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Exactas
Departamento de Física

Tesis presentada para optar al grado de
Doctor de la Facultad de Ciencias Exactas

Teorías efectivas para las interacciones hadrónicas y diagrama de fases de la cromodinámica cuántica

Juan Pablo Carlomagno

Director:

Daniel Gómez Dumm

Año 2015

Resumen

*Cuando el canto me llega, me llega así,
decidor y sentido pa' no o pa' sí.*

Herencia pa' un hijo gaucho. José Larralde

La dinámica de quarks se encuentra descrita en el marco del Modelo Standard por la Cromodinámica Cuántica (QCD), que formalmente es una teoría de campos de gauge no abeliana.

En procesos de altas energías la propiedad de libertad asintótica presente en QCD permite obtener predicciones a partir del Lagrangiano fundamental de la teoría. Sin embargo, a bajas energías ($E \lesssim 1 \text{ GeV}$), la constante de acoplamiento fuerte se vuelve grande y la teoría es no perturbativa. En este régimen los quarks se encuentran confinados en hadrones, y la simetría quiral se encuentra espontáneamente rota.

El empleo de teorías efectivas permite estudiar la materia fuertemente interactuante a temperatura y densidad finitas y realizar una descripción fenomenológica de sistemas con estas características. En esta Tesis se estudiaron modelos efectivos para la descripción de la interacción fuerte a bajas energías. En particular, se consideraron teorías con interacciones no locales para tres sabores de quarks con renormalización de la función de onda y con un parámetro de orden efectivo asociable al confinamiento y a los grados de libertad gluónicos. Se estudió también, pero en modelos con dos sabores de quarks, la posibilidad de que el parámetro de orden de la simetría quiral presente una estructura modulada espacialmente.

El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera:

En el Cap. 1 se realiza una descripción acotada del diagrama de fases QCD y del comportamiento a bajas energías de la materia fuertemente interactuante, presentando las problemáticas de lidiar con esta teoría en la vecindad de las transiciones de fase y describiendo dos de las principales alternativas para hacerlo: *lattice QCD* (LQCD) y teorías efectivas, en particular el modelo propuesto por Nambu y Jona-Lasinio (NJL).

En la primera parte del Cap. 2 se presenta un breve resumen de los aspectos más relevantes para esta Tesis sobre la Cromodinámica Cuántica, que servirán para trazar similitudes con los modelos efectivos. Se comienza con el modelo de quarks, pasando luego por el lagrangiano de QCD y sus simetrías, para posteriormente considerar QCD a temperatura y potencial químico finito.

En la segunda parte, se describe el Loop de Polyakov, cuya traza se utilizará como parámetro de orden para estudiar el deconfinamiento de los quarks. Finalmente se detallan brevemente las técnicas de LQCD.

En el Cap. 3 se analiza el modelo efectivo de Nambu y Jona-Lasinio para los sabores de quarks *up* y *down*, y su extensión al incluir el quark *strange*. Se estudian también los núcleos de interacciones no locales y se introduce la renormalización de la función de onda (WFR). Luego, en el Cap. 4, se desarrollan las extensiones del modelo de NJL sobre las cuales se trabajará durante el resto de la Tesis. En este capítulo se presentan también los resultados a temperatura y densidad nula, fijando los parámetros libres del modelo.

En el Cap. 5 se estudian las transiciones de fase para un modelo acoplado de Polyakov y Nambu Jona-Lasinio para tres sabores de quarks, a densidad nula y finita. En la parte final del Capítulo se muestran los diagramas de fases en el marco del mencionado modelo.

En la primera parte del Cap. 6 se lleva a cabo un análisis general para un modelo de tipo NJL no local con dos sabores de quarks de masa nula con condensados inhomogéneos y se caracterizan las regiones y curvas de transición de los diagrama de fases. En la segunda parte, se presentan los resultados para un caso particular de modulación espacial.

Finalmente en el Cap. 7 se realiza una discusión global de los resultados y se presentan las conclusiones.

Índice

Resumen	III
1. Introducción	1
2. Aspectos básicos de QCD	5
2.1. El modelo de quarks	5
2.2. El lagrangiano de QCD	7
2.3. Ruptura espontánea de la simetría quiral	9
2.3.1. Extensión a tres sabores	11
2.3.2. Anomalía axial	12
2.4. QCD a temperatura y potencial químico finitos	13
2.5. El loop de Polyakov	14
2.5.1. Simetría global $Z(N)$ en $SU(N)$	14
2.5.2. $Z(N)$ a temperatura finita	15
2.6. Lattice QCD	17
3. Modelo de Nambu Jona-Lasinio	19
3.1. Teorías efectivas de QCD	19
3.2. Modelo Nambu-Jona-Lasinio (NJL)	20
3.2.1. Generación dinámica de masa fermiónica	21
3.2.2. Bosón de Goldstone pseudoescalar	24
3.3. El modelo de NJL con tres sabores de quarks	26
3.4. Núcleos de interacción no locales	28
4. Fenomenología de mesones en un modelo nlNJL con simetría $SU(3)$ de sabor	33
4.1. Modelo no local con simetría $SU(3)$ de sabor y WFR	33
4.1.1. Acción efectiva	33
4.1.2. Aproximación de campo medio	35
4.1.3. Fluctuaciones cuadráticas	38
4.1.4. Constante de decaimiento débil	40

4.2. Parametrizaciones del modelo NJL no-local	42
4.3. Resultados numéricos	44
5. Transiciones de fase en un modelo nlPNJL	
con simetría $SU(3)$ de sabor y WFR	47
5.1. Modelo de Polyakov Nambu Jona-Lasinio	47
5.2. Transiciones de fase a potencial químico nulo	52
5.2.1. Termodinámica a campo medio	52
5.2.2. Resultados numéricos a temperatura finita	54
5.3. Diagrama de fases de QCD en un modelo nlPNJL con WFR	58
5.3.1. Transiciones de fase en el plano $T - \mu$	62
6. Transiciones de fase inhomogéneas en un modelo	
nlNJL con simetría $SU(2)$ de sabor	65
6.1. Introducción a las fases inhomogéneas	65
6.2. Teoría de Landau	67
6.3. Modulación espacial de los condensados quirales	68
6.4. Modelo no local quiral con simetría $SU(2)$ de sabor	69
6.4.1. Análisis generalizado de Ginzburg-Landau	71
6.5. Condensados inhomogéneos en modelos no locales	76
6.5.1. Onda dual de densidad quiral (DCDW)	77
6.6. Diagramas de fase para factores de forma covariantes	79
7. Resumen y Conclusiones	85
A. Parametrización de un modelo quiral nlNJL	
con simetría de sabor $SU(2)$	89
B. Cálculo de las sumas de Matsubara	91
Bibliografía	95